

3. Ackelid U., Svensson M. Additive manufacturing of dense metal parts by electron beam melting //Proceedings of the Materials Science and Technology Conference, Pittsburgh, PA, USA. – 2009. – Т. 2529.
4. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: a review //Journal of Materials Engineering and performance. – 2014. – Т. 23. – №. 6. – С. 1917-1928.
5. Tolochko N. K. et al. Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder //Rapid prototyping journal. – 2003.

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО СПЛАВЛЕНИЯ

*Ц. Хань^а, аспирант гр. А1-21, Р.И. Юсупов, аспирант гр. А0-21, В.В.Фёдоров,
научный руководитель: Клименов В.А., профессор, д.т.н.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томская обл., г.Томск, пр. Ленина, 30,
E-mail: hanzelizy@gmail.com^а*

Аннотация. В статье описываются особенности разработки оборудования и технологии электронно-лучевого селективного сплавления порошка и послойного сплавления проволоки на основе комплексного применения металлургических подходов, автоматизации и математического моделирования условий формирования материала. Показано, что многоуровневый подход в исследовании физических процессов и структуры имеет большие сложности и не позволяет оценить макродефекты и их влияние на качество изделия. Рассматриваются возможности машинного обучения для оценки качества формируемого изделия.

Abstract. The article describes the features of the development of equipment and technology for electron-beam selective fusion of powder and layer-by-layer fusion of wire based on the integrated application of metallurgical approaches, automation, and mathematical modeling of material formation conditions. It is shown that a multilevel approach to the study of physical processes and structure is very complex and does not allow assessing macrodefects and their impact on product quality. The possibilities of machine learning for assessing the quality of the formed product are considered.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, электронно-лучевое оборудование, порошки и проволока титановых сплавов, структура и свойства, математическое моделирование, машинное обучение.

Keywords: Additive manufacturing, electron-beam equipment, powders and wires of titanium alloys, structure and properties, mathematical modeling, machine learning.

Аддитивные технологии – технологии послойного выращивания из различных материалов объектов, с заданными характеристиками и требующих минимальных доработок, а иногда и без них. Они нашли широкое применение в медицине, машиностроении, и других высоко технологичных сферах. При формировании изделия из различных филаментов, необходимо учитывать большое число параметров, включающих мощность и скорость перемещения источника нагрева. Выбор параметров очень важен, так как они определяют форму и размер ванны расплава и результирующие термические циклы, скорость охлаждения, температурные градиенты и скорость затвердевания, которые в свою очередь определяют формирование микроструктуры, дефектов и свойств. Подбор оптимальных параметров процесса сплавления или спекания и их контроль в процессе печати приводят к улучшению качеств получаемых изделий. Предсказание микроструктуры, свойств и дефектов при печатании деталей требуют понимания металлургических процессов протекающих в условиях характерных для АТ [1].

В 2015 году была создана в ТПУ модульная установка электронно-лучевого сплавления порошков и наплавки проволокой [2]. Для автоматизации процесса печати с целью улучшения качество продукции и снижения процента брака была разработана программа управления на основе системы Linux [3]. Для управления установкой было разработано программное обеспечение, которое предназначено для управления режимами электронно-лучевого сплавления (ЭЛС) металлических порошков в условиях вакуума [2]. Программа обеспечивает сбор информации с датчиков вакуума, отклонением пучка посредством G-code, а также осуществляет ввод параметров силы тока, фокусировки и напряжения ускорения. Считываются данные, а затем записываются переменные напряжения, координаты положения манипулятора к которым необходимо двигаться, параметры вакуума, мощность луча, количество порошка и все возвращается в цикле программы в основную часть для вычисления траектории движения. Происходит инициализация драйверов. Затем происходит запуск луча.

При печати деталей из сплава (Ti-6Al-4V) и нержавеющей стали (AISI 308), качество образцов на микро-, мезо- и макроуровне и механическим свойствам изучалось методами металлографии и неразрушающего контроля (компьютерная томография) и механических испытаний. Эксперименты показали, что изменение тока пучка косвенно влияет на фазовый состав отпечатков титановых сплавов. Помимо экспериментальных исследований, методами численного моделирования исследовано влияние тока пучка на микроструктуру и микротвердость титановых сплавов, напечатанных с использованием электронных пучков в качестве источника энергии. Результаты моделирования показали, что уменьшение тока пучка с 3,5 мА до 2,5 мА приводит к уменьшению размера микроструктуры, поскольку материал имеет более высокую скорость охлаждения при более низком токе пучка, за счет этого улучшаются механические свойства деталей [4]. Однако эксперименты показали, что увеличение тока пучка с 2,5 мА до 3,5 мА приведет к увеличению плотности отпечатков титанового сплава, то есть к снижению пористости [5]. Изучение влияния схемы послойной наплавки на микроструктуру и механические свойства печатных деталей показывают что, микроструктура исходных образцов и площади поперечного сечения исходных не зависели от скорости охлаждения металла, но на них влияли стратегии наплавки. Результаты компьютерной томографии показали, что напечатанная деталь материалом из титанового сплава имеют в целом сферические поры, размеры пор, характер их распределения зависит от режимов и стратегии наплавки, на образцах из нержавеющей стали при оптимальных режимах пористость практически отсутствует. Из этого следует, что снижение макро пористости в титановых сплавах требует новых подходов к оптимизации макро-структуры. Продольная и поперечная твердость детали из исследуемых сплавов различна, связано с различием зёрненной структуры в вертикальном и продольном направлении. Результаты испытаний на сжатие соответствовали сформированной макро- и микроструктуре.

Рассматривая роль методов математического моделирования в отработке технологий аддитивного производства, следует отметить такие сложности, существующие на сегодняшний день, как необходимость с одной стороны распараллеливания описания процессов на различных уровнях, с другой их согласованного рассмотрения. То есть, из-за большого количества влияющих параметров данной технологии, когда в процессе моделирования необходимо использовать большое количество базовых формул и находить сложную взаимосвязь между ними, такого рода трудности становятся труднопреодолимыми для разработчиков аддитивных технологий при применении металлических материалов. С быстрым развитием технологий машинного обучения исследователи могут использовать методы машинного обучения, такие как глубокое обучение, нейронная сеть, алгоритмы кластеризации для построения моделей. Это позволяет лучше настроить параметры процесса для получения качественных деталей. Эффективное использование и воздействие подбора алгоритмов и по качеству и объему данных влияют на точность, надежность и скорость. Например, решение проблемы классификации данных, такие как «обнаруженные» или «не обнаруженные» поры в отпечатанных металлических детали лучше всего рассматриваются с помощью классификатора на основе атрибутов алгоритм, такой как «случайный лес»[8] или «дерево решений», или с помощью нейронной сети, основанная на регрессии. Машинное обучение, на основе регрессии, может использоваться для изучения влияния подачи скорость, шага штриховки, мощности лазера и скорости подачи прутка. Вышеупомянутое предложения машинного обучения, указывают на их способность оптимизировать[9] параметры процесса на основе полученных данных. Оптимизация параметров процесса печати улучшаются по мере увеличения количества данных накапливаются со временем. Машинное обучение может быть используется для мониторинга и контроля печати на металле, и, следовательно, для уменьшения образования дефектов[10] и улучшения размеров точность.

Машинное обучение может применить в таких направлениях, как дизайн детали, планирование процесса, управление и контроль, машинное обучением может помочь уменьшить и снизить дефекты, достичь превосходных микроструктур и свойств и способствовать инспекции качества продукта для ускоренной квалификации продукта. Синергетический эффект применения металлургии, механистических моделей и машинного обучения является очень важным для конструирования, планирования процессов, производства, квалификации и оценки эффективности напечатанных деталей.

Список используемых источников:

1. DebRoy, T., Mukherjee, T., Wei, H.L. et al. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing // *Nat Rev Mater.* – 2021. – Vol. 6. – P. 48–68.

2. Fedorov V.V., Klimenov V.A., Batranin A.V., Ranga P. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167. – P. 020097.
3. Федоров В.В., Кузьменко И.Ю., Юркина В.А., Густомясов М.А., Юсупов Р.И., Клименов В.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021614248. «Управление установкой электронно-лучевого сплавления порошков» – 2021.
4. Pushilina, N.S., Klimenov, V.A., Cherepanov, R.O. et al. Beam Current Effect on Microstructure and Properties of Electron-Beam-Melted Ti-6Al-4V Alloy // J. of Materi Eng and Perform. – 2019. – Vol. 28. – P. 6165–6173.
5. Vasilii Fedorov, Vasilii Klimenov, Roman Cherepanov, Andrey Batranin, Powder and wire melting of titanium alloys by electron beam // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 37. P. 584-591.
6. Klimenov, V.A., Fedorov, V.V., Slobodyan, M.S. et al. Microstructure and Compressive Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Built by Electron Beam Free-Form Fabrication // J. of Materi Eng and Perform – 2020. – Vol. 29. – P. 7710–7721.
7. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal Graphs and Manifolds, Ch. 2 in: Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques, Emilio Soria Olivas et al. (eds) // IGI Global, Hershey, PA, USA, – 2009. – P. 28-59.
8. Barrios, J.M. & Romero, P.E. Decision tree methods for predicting surface roughness in fused deposition modeling parts // Materials. – 2019. – Vol. 12. – P. 2574.
9. Gobert, C., Reutzler, E.W., Petrich, J., Nassar, A.R. & Phoha, S. Application of supervised machine learning for defect detection during metallic powder bed fusion additive manufacturing using high resolution imaging // Addit. Manuf. – 2018. – Vol. 21. – P. 517–528.
10. Aboutaleb, A. M. et al. Accelerated process optimization for laser-based additive manufacturing by leveraging similar prior studies // IISE Trans. – 2017. – Vol. 49. – P. 31–44.

НАДЕЖНОСТЬ ЛИТЫХ ДЕТАЛЯХ ГРУЗОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*М.И. Пятков, гр. О-18-ПМ-нбм-Б,
научный руководитель: Татаринцев В.А., доцент, к.т.н.,
Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д.7
E-mail: m404pyatkov@bk.ru*

Аннотация. Разрушение литых деталей грузового железнодорожного подвижного состава, в частности в автосцепках, происходят в различных условиях, месте и времени. Их причинами являются: напряженное состояние, наличие дефектов в виде усталостных трещин, которые появляются в местах наибольшей концентрации напряжений под действием эксплуатационной нагруженности, низкие температуры. Выявлен закон надежности корпуса автосцепки для случая его разрушения по переходному сечению.

Abstract: The destruction of cast parts of freight railway rolling stock, in particular in automatic couplers, occurs in various conditions, place and time. Their causes are: the stress state, the presence of defects in the form of fatigue cracks that appear in places of the highest stress concentration under the action of operational loading, low temperatures. The law of reliability of the automatic coupler body for the case of its destruction along the transitional section is revealed.

Ключевые слова: дефекты, разрушение, усталостные трещины, литые детали.

Keyword: defects, failure, fatigue cracks, cast parts.

Основным источником подробной информации об условиях разрыва автосцепок в поездах являются донесения об обрывах. Одним из важнейших условий достаточно точного определения количественных показателей надежности является обеспечение представительности исходных статистических данных. Анализ более 300 актов позволяет судить об устойчивости процесса, т.к. разрывы автосцепок происходили в различных условиях, месте и времени. После проверки устойчивости процесса отказов производилось выявление основных причин разрывов автосцепок в поездах. При рассмотрении донесений основное внимание было уделено анализу размеров трещин и мест их расположения, температуры окружающего воздуха в момент разрыва автосцепок, веса поездов, режима движения, вида тяги. Как показывает анализ актов о разрывах автосцепок, значительные различия наблюдаются в характере